

УДК 621.793

М. А. Гребенников, С. Д. Зиличихис, И. А. Стебельков*ГП «Ивченко-Прогресс», г. Запорожье***ФИЗИКА И ТЕХНОЛОГИЯ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ В ПОЛЕ УЛЬТРАЗВУКА**

В статье представлены основные физические законы процесса упрочнения деталей при помощи ультразвуковых колебаний и рассмотрены наиболее важные его особенности.

Ключевые слова: ультразвук, колебание, частота, акустическая жесткость, резонанс, рабочий объем, деформация, материал.

Процесс упрочнения деталей в поле ультразвука за свою более чем 30-летнюю историю развития занял прочное место в технологии авиационного двигателестроения и нашел свое применение на производствах в странах как ближнего, так и дальнего зарубежья.

За время развития и освоения процесса, специалистами инженерной и научной сфер былработан огромный опыт в его применяемости при изготовлении широкого спектра деталей газотурбинных и др. двигателей, в проектировании оборудования и различной оснастки, в расчетах волноводов и в прогнозировании его эффективности. Но при становлении любого процесса невозможно избежать проблем с непониманием явлений, которые выходят за рамки простой механики. Тут уже становится важным иметь необходимые знания физических аспектов и факторов, возникающих в механизме самого процесса.

Данная статья открывает лишь некоторые процессообразующие физические принципы, без понимания которых невозможно достигнуть эффективности в механизме пластической деформации.

Наиболее важным физическим явлением в технологии упрочнения является ультразвуковое поле. Ультразвуковое поле (пространство, заполненное упругой, звуковой волной) характеризуется целым рядом акустических и механических величин и условий, которые необходимо знать и выполнять при осуществлении процесса упрочнения деталей.

Ультразвук – упругие колебания и волны, частота которых превышает $(1,5...2) \cdot 10^4$ Гц. Нижняя граница ультразвуковых частот определяется субъективными свойствами человеческого уха и является условной. Верхняя граница ультразвуковых частот обусловлена физической природой упругих волн, которые могут распространяться при условии, что длина волны значительно больше длины свободного пробега молекул в газах или межатомных расстояний в жидкостях и твердых телах. Поэтому в газах верхнюю гра-

ницу частот определяют из условия равенства длины звуковой волны и длины свободного пробега молекул. При нормальном давлении она составляет $\approx 10^9$ Гц. Упрочнение деталей в поле ультразвука производят на низких ультразвуковых частотах $1,5 \cdot 10^4...10^5$ Гц. Иногда частотный диапазон не ограничивается снизу строго частотой $(1,5...2) \cdot 10^4$ Гц, а может захватывать и часть слышимого диапазона частот.

Ультразвуковые волны (неслышимый звук) по своей природе не отличаются от упругих волн слышимого диапазона. В газах и жидкостях распространяются только продольные волны, а в твердых телах, в зависимости от их геометрии, могут распространяться продольные, сдвиговые, и изгибные волны.

Распространение ультразвука подчиняется основным законам, общим для акустических волн любого диапазона частот, обобщенно называемых звуковыми волнами. К основным законам распространения звука относятся: законы отражения звука, преломление звука на границах различных сред, дифракции звука и рассеяния звука при наличии препятствий, неоднородностей в среде и неровностей на границах, законы волнового распространения в ограниченных объемах среды. Существенную роль при этом играет соотношение между длиной волны λ и размером рабочего объема или расстояния до препятствия на пути распространения звуковой волны.

Важной акустической характеристикой является дисперсия скорости звука – зависимость скорости звуковых волн от их частоты, которая может быть вызвана физическими свойствами среды и присутствием в ней посторонних включений и наличием границ объема среды, в котором звуковая волна распространяется.

Не менее важная характеристика – акустическая релаксация, т. е. процесс восстановления термодинамического равновесия среды, нарушаемого сжатиями и разрежениями в ультразвуковой волне, что всегда сопровождается большим поглощением звука, а также дисперсией скорос-

ти звука. Особенно релаксационные процессы заметны (сильны) в синтетических полимерах (полиимидах): капронах, капролонах, резинах и различных вязко-упругих средах. В этих веществах наблюдается значительная дисперсия звука, вызванная релаксацией механизма высокой эластичности, поэтому они используются для глушения звуковых волн и непригодны для применения в процессах с использованием энергии упругой звуковой волны.

Акустические свойства однородной, проводящей звук, неограниченной среды характеризуются удельным волновым сопротивлением Z_0

$$Z_0 = \rho \cdot C,$$

где ρ — плотность среды;

C — скорость распространения звуковых волн в среде.

Скорость звуковой волны связана с ее волной λ и частотой f зависимостью:

$$C = \lambda \cdot f.$$

Если звуковая волна упруго отражается от граничной поверхности, то в волновом поле перед этой поверхностью возникает интерференция падающей и отраженной волн. Волна, отраженная от среды более жесткой, чем та, в которой она распространялась, приобретает сдвиг фазы равный 180° . В отраженной волне скорость звука равна по величине и противоположна по направлению скорости звука в падающей волне, так что они взаимно уничтожаются. Зато давление звука на границе в этом случае равно удвоенному давлению в падающей волне. Амплитуда колебаний частиц среды принимает максимальное положительное и отрицательное значение с удвоенной частотой, т. е. $2f$ раз в секунду. Возникает стоячая волна, в которой на расстояниях $\lambda/2$ располагаются узловые сечения, а между узлами — пучности. В бегущей волне пучности и узлы колебаний в любом сечении среды чередуются.

В случае, когда среда неоднородна, например как при ультразвуковом упрочнении — «воздух + стальные шарики», и заключена в жесткие, проводящие звук границы рабочего объема, обеспечивающие упругое отражение звуковой волны и шариков от своих границ, то такая среда характеризуется акустической жесткостью H

$$H = 2\pi f \cdot \rho \cdot C.$$

Размеры рабочего объема должны обеспечить резонанс вынужденных колебаний среды с упругими колебаниями волновода.

Резонанс — явление возрастания амплитуды вынужденных колебаний в любой колебательной системе, наступающее при приближении частоты периодического внешнего воздействия к одной из частот собственных колебаний. Ампли-

туда колебаний при резонансе тем больше, чем меньше затухание в системе, т. е. чем больше ее упругость.

Вещества непроводящие звук (акустическая жесткость которых равна нулю), такие как пластик, текстолит или капролон, не могут быть использованы для изготовления рабочих камер, т. к. процесс упрочнения в таких камерах протекает в режиме затухающей волны, причем затухание происходит уже на малом расстоянии от излучающей поверхности волновода. В связи с этим, рабочие камеры для упрочнения деталей нужно изготавливать из материалов, проводящих звук — металлов (имеющих акустическую жесткость).

Специалисты, обеспечивающие качество упрочнения деталей в поле ультразвука, должны понимать, что рабочий объем является колебательной системой, работающей на вынужденных колебаниях в режиме упругой стоячей волны. Стоячая волна возникает в рабочем объеме, когда расстояние между двумя отражающими поверхностями равно $n \cdot \lambda/2$, где n — целое число. В этом случае наблюдаются резонансные явления в объеме среды, находящейся между отражающими поверхностями, поэтому амплитуда колебаний возрастает до больших значений, ограниченных только потерями в среде и тем, что коэффициент отражения отличен от единицы. При увеличении амплитуды колебаний частиц среды возрастает и колебательная скорость и амплитуда звукового давления, т. е. происходит самовозбуждение интенсивности колебательного процесса в среде рабочего объема без дополнительного подвода энергии. Этим и объясняется высокая экономичность процесса упрочнения в поле ультразвука.

Следует отметить важность нижеперечисленных особенностей процесса, которые также следует учитывать при понимании механизма ультразвукового упрочнения.

Для исключения сухого трения стальных шариков при деформационном упрочнении деталей рекомендуется упрочнение производить шариками, смоченными жидкостью, например, водой с антикоррозионными добавками. Вода в поле упругих колебаний превратится в туман — перейдет в дисперсное состояние. Тогда процесс деформации поверхности детали будет осуществляться во влажной среде.

Кроме того, нужно иметь в виду, что в среде «воздух + стальные шарики», в результате ультразвуковых колебаний возникает электрокинетический эффект — возникновение электрического поля вследствие ионизации среды рабочего объема. И если рабочая камера не заземлена, или изготовлена из диэлектрических материалов, то шарики будут намагничиваться и слипаться в отдельные группы. Это явление отрицательно влияет на динамику процесса упрочнения.

Наиболее важной особенностью является требование обеспечения в поверхностях деталей, работающих при эксплуатации в условиях контактного нагружения, в процессе их упрочнения заданной глубины деформированного слоя. Глубина деформации в поверхностном слое должна превышать глубину действия максимальных касательных напряжений, где зарождаются первичные трещины. Опасность таких трещин (питтинг) заключается в том, что они постепенно развиваются, выходят на поверхность. В дальнейшем они разрастаются и сливаются вместе, что приводит к отслаиванию и выкрашиванию с поверхности крупных частиц металла.

Четкое соблюдение оптимальных режимов упрочнения, аттестованных усталостными испытаниями в ЦИАМ, обеспечивает стабильность

получения заданных прочностных характеристик деталей. В зависимости от типоразмера и материала детали, эффективность упрочнения может составлять от 30 до 50 %.

Список литературы

1. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике / Л. Бергман ; пер. с нем. — [2-е изд.]. — М., 1957. — 727 с.
2. Физическая акустика: в 4-х т. / [под ред. У. Мэзона] ; пер. с англ. — М. : Мир, 1966. — 592 с.
3. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Глав. ред. И. П. Галямина. — М. : Советская энциклопедия, 1979. — 400 с.

Поступила в редакцию 25.10.2012

Гребенников М.О., Зілічіхіс С.Д., Стебельков І.А. Фізика і технологія зміцнення деталей в полі ультразвуку

У статті подано основні фізичні закони процесу зміцнення деталей за допомогою ультразвукових коливань та розглянуто найбільш важливі його особливості.

Ключові слова: *ультразвук, коливання, частота, акустична жорсткість, резонанс, робочий об'єм, деформація, матеріал.*

Grebennikov M., Silichikhis S., Stebelkov I. Physical and technological aspects of parts strengthening in ultrasonic field

The paper presents main physical laws of parts hardening process by means of ultrasonic vibrations and considers its most important features.

Key words: *ultrasonic, vibrations, frequency, acoustic stiffness, resonance, working volume, deformation, material.*